

高出力・高効率純緑色レーザエピの 光物性評価

京野孝史*・塩谷陽平・西塚幸司
上野昌紀・中村孝夫・川上養一

Optical Characteristics of InGaN Quantum Wells for Green Laser Diodes on Semi-Polar $\{20\bar{2}1\}$ GaN Substrates — by Takashi Kyono, Yohei Enya, Koji Nishizuka, Masaki Ueno, Takao Nakamura and Yoichi Kawakami — Optical characteristics of InGaN quantum wells (QWs) for green laser diodes on semi-polar $\{20\bar{2}1\}$ GaN substrates were assessed using time-resolved photoluminescence (TRPL) and scanning near-field optical microscopy (SNOM). The InGaN QWs exhibited a remarkably shorter PL lifetime of 3.1 ns compared with that of conventional c-plane InGaN QWs, indicating that the piezoelectric fields are well reduced on $\{20\bar{2}1\}$ planes. Furthermore, the characteristic energy E_0 was estimated to be as small as 15.1 meV, which is less than one third of the reported value for c-plane InGaN QWs. Since E_0 represents the localization depth in InGaN QWs, this result proves the high homogeneity of the In composition on $\{20\bar{2}1\}$ planes. This conclusion was also verified by the spatially uniform distribution of the PL intensity and wavelength obtained by SNOM. These features are essential for the highly efficient emission in the green spectral region, consequently suggesting that the semi-polar $\{20\bar{2}1\}$ plane is suitable for fabricating green laser diodes.

Keywords: GaN, green laser, time-resolved photoluminescence, scanning near-field optical microscopy

1. 緒言

光の三原色（赤・緑・青）のレーザ光源は、レーザプロジェクタなど映像表示デバイスの高性能化につながるものと期待されている。赤色、青色に比べて緑色の半導体レーザの実現は難しく実用化が渴望されていた中、当社では2009年に世界に先駆けてInGaN系純緑色レーザの開発に成功した^{(1)~(4)}。また、前稿「高出力・高効率純緑色レーザの開発」で述べたように、高出力化と信頼性確保の点でも進展している^{(5),(6)}。一連の開発において鍵となったのが、 $\{20\bar{2}1\}$ 面という新しい面方位を有するGaN基板の適用である。この面方位は、従来のc面上でInGaN緑色レーザの実現を阻んでいた2つの課題、すなわち1) ピエゾ電界と2) In組成揺らぎの克服に結び付いた。これまで、新規GaN基板がもたらす上記効果を主にデバイス試作とその特性評価を通じて明らかにしてきた。本稿では、京都大学と共同で時間分解フォトルミネセンス（time-resolved photoluminescence: TRPL）と走査型近接場光学顕微分光（scanning near-field optical microscopy: SNOM）という光物性評価を行い、ピエゾ電界やIn組成揺らぎが密接に関連するキャリアダイナミクスを観測した結果について紹介する。これらを通じて、 $\{20\bar{2}1\}$ 面上InGaNが有するc面上にはない特徴を明らかにするとともに、その光物性とデバイス特性との関連について述べる。

2. 緑色レーザ向けInGaNの課題

緑色レーザ向けエピタキシャル層の発光層にはGaNとInNの混晶であるInGaNが用いられる。波長525~535nmの緑色発光を得るためには、In組成を約30%程度にまで高める必要がある。この時、GaNとInNの格子定数が大きく異なることに起因して、2つの問題が生じる。1つ目は、発光層内部に発生するピエゾ電界が大きくなることである。ピエゾ電界とは、InGaNが成長面内方向に圧縮歪みを受ける時に、正の電荷を持つGa及びInと負の電荷を持つNの分極のバランスが崩れることに由来して、c軸方向に生じる電界のことである。図1(a)に示すように、これによりInGaN発光層のバンドが曲がり、電子と正孔の波動関数の重なり度合いが小さくなるために、発光再結合の確率が低下する^{(7),(8)}。

2つ目の問題は、In組成の不均一性、いわゆるIn組成揺らぎが増大することである。GaNとInNは、前出の大きな格子定数差に起因して非混和性を示し⁽⁹⁾、InGaN発光層内のIn組成は自発的に不均一になりやすい。この時、InGaN発光層のエネルギー準位には図2のように局所的にIn組成の高い領域が形成される。この領域は局在準位と呼ばれ、発光層に注入されたキャリア（電子と正孔）の一部はエネルギーの低い局在準位へと拡散する。発光層内のIn組成が比較的低い青色InGaN発光ダイオード（LED*1）の場合には、この拡散現象がキャリアの非発光再結合中心への捕獲

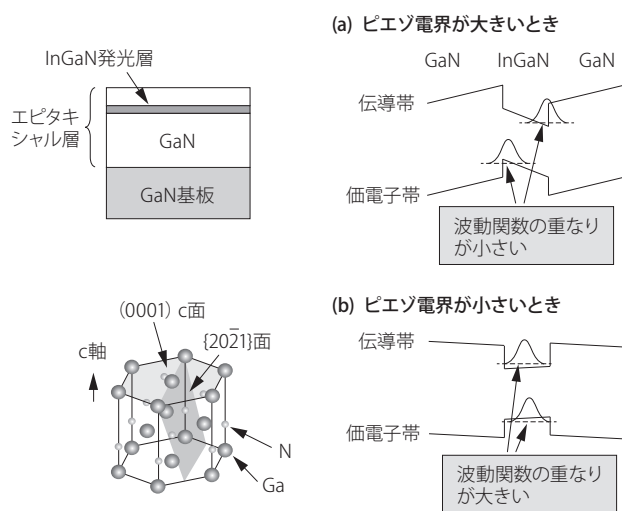


図1 ピエゾ電界が及ぼす影響

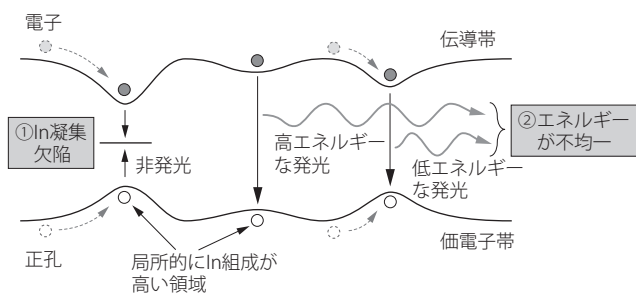


図2 In組成揺らぎが及ぼす影響

を抑制し、発光効率の向上に寄与した^{(10)、(11)}。しかし、高いIn組成が必要となる緑色InGaIn発光層では、局所的にInリッチな局在準位においてInが凝集し、欠陥発生を招くことが報告されている(図2①)⁽¹²⁾。つまり、緑色LEDにとっては局在準位へのキャリア拡散はむしろ逆効果となり、発光効率を低下させる要因となるのである。さらに、レーザの場合はIn組成揺らぎに起因する不均一な発光エネルギーが増幅作用の妨げになるため、しきい値電流やスロープ効率に悪影響を及ぼすというLEDにはない問題も生じる(図2②)⁽¹³⁾。従って、緑色レーザ向けの高In組成InGaIn発光層には、In組成揺らぎの低減が極めて重要になる。

前者のpiezoelectric fieldはc軸方向に発生するため、c面から傾いた方向にエピタキシャル層を作製することでその影響を低減することができる(図1(b))。これまで、m面、a面、(1122)面などが精力的に検討され、その効果が実証されてきたが、後者のIn組成揺らぎにまつわる課題は依然克服されずにいた。対して、{2021}面上に作製したレーザ構造は非常に均一性の高いフォトルミネセンス(PL)像や狭い発

光スペクトル幅を示し、piezoelectric fieldのみならずIn組成揺らぎの低減にも優位性を発揮しているものと考えられる^{(1)、(3)}。今回、このような{2021}面特有の現象の背景にある発光機構を明らかにするために、TRPLとSNOMを用いて局在準位の定量的評価を行った。

3. 実験

3-1 試料構造 評価用試料として、{2021}面自立GaIn基板上に波長525nm帯のInGaIn単一量子井戸(SQW^{※2})発光層を有するエピタキシャル層構造を作製した。GaIn基板はハイドライド気相成長(HVPE^{※3})法によって作製した⁽¹⁴⁾。GaIn基板はn型導電性を有し、その転位密度は $1 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 以下である。エピタキシャル層の成長は有機金属気相成長(OMVPE^{※4})法によって行った。GaIn基板上に膜厚2 μm のn型GaInを成長した後、膜厚100nmのInGaInバッファ層、膜厚15nmのGaInバリア層、膜厚3nmのInGaIn井戸層、膜厚10nmのGaInキャップ層を順に成長した。

3-2 TRPLとSNOM評価手法 本稿で用いた評価手法のうち、まずTRPLについて説明する。TRPLは、試料へのパルス光照射によって発生するPLが時間とともに減衰する過渡現象を観測する手法である。励起光源にはチタンサファイアレーザの第2高調波を用い、繰り返し周波数は4MHz、パルス幅は1.5psとした。また、InGaIn発光層を選択的に励起するために、励起波長は400nmとした。試料温度はクライオスタット内で6K~室温(300K)の範囲で制御し、励起エネルギー密度を8.6~29,000nJ/cm²の範囲で変化させた。試料からのPLはストリークカメラで検出した。

本手法によるInGaIn発光層の局在準位評価の概念を図3(a)に示す。In組成揺らぎが存在する系でエネルギーの高いPLとエネルギーの低いPLの減衰時間 τ_{PL} を比較すると、前者の方が短くなる。なぜなら、局在効果がある場合、キャリアの再結合時間(図3①)だけでなく、高いエネルギー準位から低いエネルギー準位へのキャリアの拡散

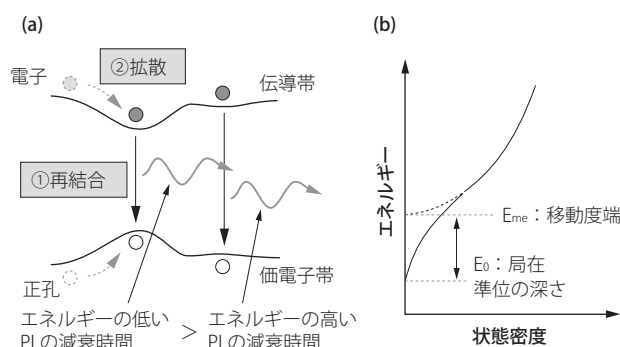


図3 局在準位のモデル化

時間 (図3②) も関与するためである。このプロセスは、図3 (b) に示す局在準位の深さ E_0 と移動度端 E_{me} を用いて、次式で表すことができる⁽¹⁵⁾。

$$\tau_{PL}(E) = \frac{\tau_{rad}}{1 + \exp\left(\frac{E - E_{me}}{E_0}\right)}$$

ここで、 τ_{rad} は発光再結合寿命である。TRPLによって得られる τ_{PL} のエネルギー依存性を、上式を用いてフィッティングすることで、InGa_N 発光層の均一性の指標となる局在準位の深さ E_0 を見積もることができる。 E_0 が小さいほど、In組成揺らぎが小さく、高い均一性を備えたInGa_N 発光層と言え、緑色レーザにとって有利となる。

次に、SNOMについて説明する。SNOM-PLは、微小開口に光を入射することで得られる近接場光をプローブに用いることにより、光の波長以下の空間分解能でPL特性を観察することができる走査型の顕微鏡である⁽¹⁶⁾。ここでは、試料の励起とPLの検出に開口径150nmのファイバースコープを用いており、ほぼ同じオーダーの空間分解能が実現できていると考えて良い。試料温度は室温とし、励起光源には選択励起となる波長405nmの半導体レーザを用いた。励起エネルギー密度は7kW/cm²であり、これは励起キャリア密度 1×10^{18} cm⁻³ に相当する。

4. 結果と考察

4-1 TRPLによる局在準位の評価 図4に、温度6Kで測定した{20 $\bar{2}$ 1}面上InGa_N-SQWのPL減衰曲線を示す。ここで、InGa_N 発光層のピエゾ電界が励起キャリアによって遮蔽されないように、励起エネルギー密度2.6μJ/cm² (励起キャリア密度 5×10^{16} cm⁻³ に相当) という弱励起条件で測定を行った⁽¹⁷⁾。これより、{20 $\bar{2}$ 1}面上のPL減衰曲線は、従来のc面上と同じく単一の指数関数的減衰ではない

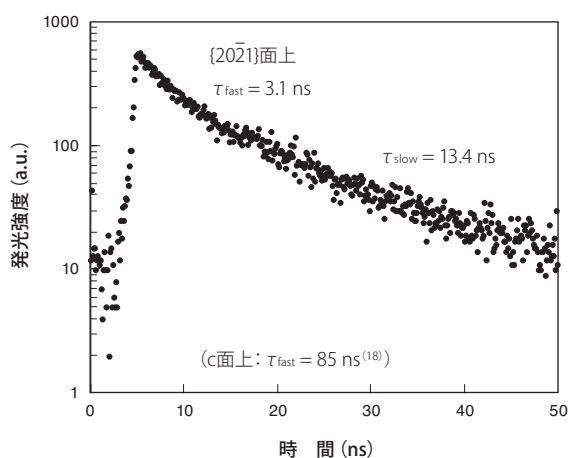


図4 温度6KにおけるPL強度の減衰曲線

ことが分かる。そこで、減衰の速い成分 (τ_{fast}) と遅い成分 (τ_{slow}) の2つが存在すると仮定し、それぞれの寿命を算出した。なお、6Kという低温では非発光再結合は無視できるため、観測しているのは発光再結合寿命と考えて良い。速い成分の発光寿命は3.1nsとなり、報告されているc面上の値(85ns⁽¹⁸⁾)に比べて非常に短いことが分かった。発光寿命は、図1で述べた電子と正孔の波動関数の重なり度の2乗に反比例する。よって、ここで得られた短い発光寿命は、{20 $\bar{2}$ 1}面上ではc面上と比較して波動関数の重なり度合いが大きい、すなわちピエゾ電界が大きく抑制されていることを意味している。

次に、{20 $\bar{2}$ 1}面上のIn組成揺らぎを評価するために、PL寿命の光子エネルギー依存性の解析を行った。結果を図5に示す。まず、(a)の温度6Kにおける測定結果を見ると、PL寿命が光子エネルギーの増加に伴い減少していることが分かる。これは、前節で述べた局在準位系に特徴的な振る舞いである。前節の式を用いて局在準位の深さを見積もったところ、 $E_0 = 15.1$ meVが得られた。これは、c面上の緑色InGa_N 発光層の報告値(51meV⁽¹⁹⁾)の3分の1以下、In組成が20%と低い青紫色InGa_N 発光層の報告値

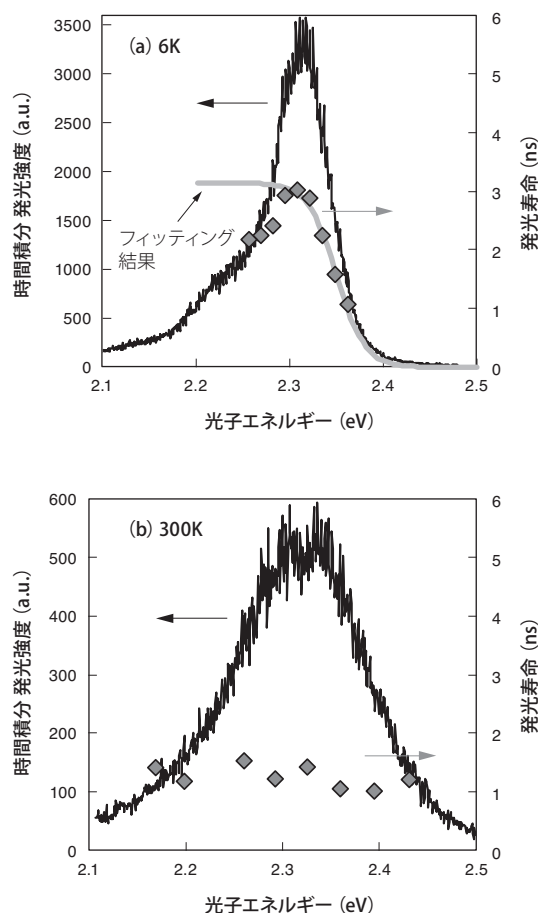


図5 (a) 温度6K および (b) 300KにおけるPLスペクトルと寿命の光子エネルギー依存性

(33.3meV⁽²⁰⁾) の約2分の1に当たり、 $\{20\bar{2}1\}$ 面上では局在準位が浅いことを意味している。さらに、 E_0 は測定温度を150K以上に上昇させた付近から減少し始め、(b)に示す300KにおいてはPL寿命の光子エネルギー依存性はほぼ消失していた。これは、 $\{20\bar{2}1\}$ 面上では局在準位が浅いため、温度上昇に伴う熱エネルギー(150Kは13meVに相当)によってキャリアが非局在化した結果と解釈できる。また、このように室温近傍でキャリア局在の挙動が認められなかったことは、レーザ向けのエピタキシャル構造において室温で観察したPL像が極めて均質であったことも整合する^{(1),(3)}。以上より、 $\{20\bar{2}1\}$ 面の適用はInGa_N発光層のIn組成揺らぎの低減に極めて有効であることが分かった。

これを別の観点から裏付けるために、PLピークエネルギーの励起キャリア密度依存性を評価した。図6に温度6Kにおける測定結果を示す。 $\{20\bar{2}1\}$ 面上のピークエネルギーはほぼ一定であり、高エネルギー側に大きくピークシフトするc面上⁽¹⁹⁾とは異なる振る舞いを示した。ピークシフトの起源としては、励起キャリアによる1) piezo電界の遮蔽と2) 局在準位のフィリングの2点が考えられる。ここで用いた励起キャリア密度($1.7 \times 10^{14} \sim 5.7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)は十分低く、1)のpiezo電界遮蔽の影響は無視できる範囲である⁽¹⁷⁾。従って、ここで見ているピークシフトには、2)の局在準位のフィリングが支配的に寄与しているものと考えられる。これより、 $\{20\bar{2}1\}$ 面上の小さいピークシフトは局在準位の状態密度が低いことを意味していると言え、前出のIn組成揺らぎが小さいとするPL寿命の解析結果と一致する。

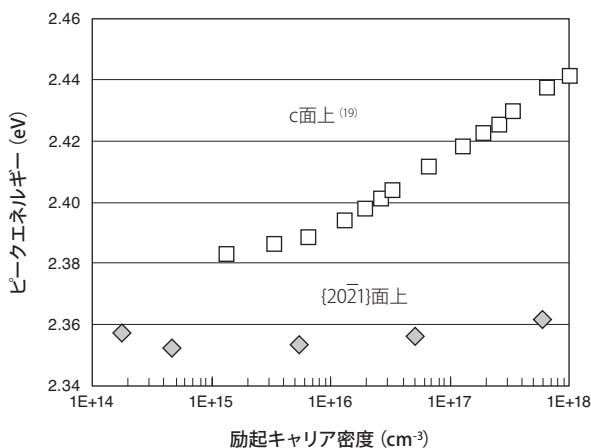


図6 PLピークエネルギーの励起キャリア密度依存性

4-2 SNOM-PLによる発光均一性の評価 TRPLでモニターしているのは、言わばマクロな領域の発光特性である。図2に示したように、InGa_Nの発光機構にはマイクロ

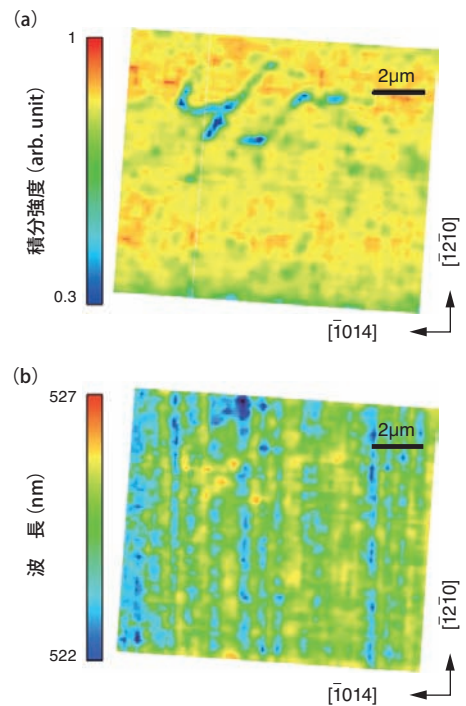


図7 SNOM-PLによる(a)積分強度と(b)波長の分布

な領域におけるキャリアの挙動が深く関与するため、局所的な発光特性の解明も合わせて重要である。そこで、SNOMによってマイクロな範囲におけるPL特性を評価した。図7に、 $\{20\bar{2}1\}$ 面上InGa_N-SQWのSNOM-PLマッピングの結果を示す。まず、(a)の積分強度に注目すると、数百nm径の島状の発光分布が認められ、最大値と最小値の比は4以下であった。c面上SQWでは約200という比が報告されており⁽²¹⁾、これと比較すると $\{20\bar{2}1\}$ 面上の強度分布は極めて小さいことが分かる。次に、(b)の波長を見ると、分布の幅は約5nmと、こちらもc面上の報告値(15nm以上⁽²¹⁾)に比べて非常に小さい値となった。なお、この波長分布において $[\bar{1}2\bar{1}0]$ 方向に沿うストライプ模様が見受けられるが、これは原子間力顕微鏡像との対応から試料表面に存在する筋状のモフォロジーに由来することが分かっている⁽²²⁾。以上の結果は、 $\{20\bar{2}1\}$ 面上InGa_N-SQWの発光特性は局所的な観点でも非常に均一性が高いことを示しており、前出のマクロなPL特性とも整合する。このような高い均一性を有するInGa_N発光層は、In偏析を起点とした非発光性欠陥の発生抑制に加えて、光の増幅に有利な発光エネルギーの均一化と、それに伴うしきい値電流やスロープ効率の改善に寄与するものと考えられる。

5. 結 言

半導体緑色レーザの実現につながった $\{20\bar{2}1\}$ 面上InGa_N発光層の性質を、TRPL及びSNOMを用いた光物性評価か

ら明らかにした内容について紹介した。 $\{20\bar{2}1\}$ 面上のPL寿命はc面上に比べて大幅に短く、InGa_N発光層におけるピエゾ電界が低減されていることを確認した。合わせて、局在準位の深さが浅い、弱励起化でのPLピークシフトが小さい、さらにはSNOM-PLによる強度と波長の分布が小さいなど、 $\{20\bar{2}1\}$ 面上InGa_NのIn組成揺らぎが小さいことを裏付ける結果を得た。これらの特徴を活かして得られる高品質なInGa_N発光層が、緑色レーザの実現とその後の高出力化、長寿命化に大きな役割を果たしたと言える。以上のように、基礎物性の観点からも $\{20\bar{2}1\}$ 面上InGa_N発光層の優位性が確認され、 $\{20\bar{2}1\}$ 面Ga_N基板が緑色レーザに最適であることが実証された。こういった発光機構の解明は材料開発を加速する上で極めて有用であり、今後の応用拡大を見据えた $\{20\bar{2}1\}$ 面上緑色レーザのさらなる特性向上に結び付くものと期待できる。

6. 謝 辞

本研究における測定およびその解釈に関して多大なご協力と貴重なご助言をいただいた京都大学 工学研究科 電子工学専攻 船戸充准教授、金田昭男助教、金潤碩氏に感謝いたします。

用語集

※1 LED

Light Emitting Diode：電流を注入し電子の持つエネルギーを光に変換する半導体素子。

※2 SQW

Single Quantum Well：膜厚が数nmオーダーの材料（井戸層）を井戸層よりもバンドギャップが大きい材料（障壁層）で挟んだ構造。多周期の場合は Multiple Quantum Well (MQW) と呼ぶ。

※3 HVPE

Hydride Vapor Phase Epitaxy：V族原料に水素化物ガスをを用いる気相成長方法。

※4 OMVPE

Organometallic Vapor Phase Epitaxy：構成元素の原料に有機金属化合物蒸気を用いる気相成長方法。

参 考 文 献

- (1) 京野孝史、塩谷陽平、秋田勝史、上野昌紀、足立真寛、住友隆道、徳山慎司、池上隆俊、片山浩二、中村孝夫、「世界初の新規Ga_N基板上純緑色レーザ開発Ⅰ」、SEIテクニカルレビュー176号、pp.88-92 (2010)
- (2) 足立真寛、京野孝史、塩谷陽平、秋田勝史、上野昌紀、住友隆道、徳山慎司、池上隆俊、片山浩二、中村孝夫、「世界初の新規Ga_N基板上純緑色レーザ開発Ⅱ」、SEIテクニカルレビュー176号、pp.93-96 (2010)
- (3) Y. Enya, Y. Yoshizumi, T. Kyono, K. Akita, M. Ueno, M. Adachi, T. Sumitomo, S. Tokuyama, T. Ikegami, K. Katayama and T. Nakamura, "531 nm Green Lasing of InGa_N Based Laser Diodes on Semi-Polar $\{20\bar{2}1\}$ Free-Standing Ga_N Substrates", Appl. Phys. Express 2 (2009) 082101
- (4) Y. Yoshizumi, M. Adachi, Y. Enya, T. Kyono, S. Tokuyama, T. Sumitomo, K. Akita, T. Ikegami, M. Ueno, K. Katayama and T. Nakamura, "Continuous-Wave Operation of 520 nm Green InGa_N-Based Laser Diodes on Semi-Polar $\{20\bar{2}1\}$ Ga_N Substrates", Appl. Phys. Express 2 (2009) 092101
- (5) S. Takagi, Y. Enya, T. Kyono, M. Adachi, Y. Yoshizumi, T. Sumitomo, Y. Yamanaka, T. Kumano, S. Tokuyama, K. Sumiyoshi, N. Saga, M. Ueno, K. Katayama, T. Ikegami, T. Nakamura, K. Yanashima, H. Nakajima, K. Tasai, K. Naganuma, N. Fuutagawa, Y. Takiguchi, T. Hamaguchi and M. Ikeda, "High-Power (over 100 mW) Green Laser Diodes on Semipolar $\{20\bar{2}1\}$ Ga_N Substrates Operating at Wavelengths beyond 530nm", Appl. Phys. Express 5 (2012) 082102
- (6) K. Yanashima, H. Nakajima, K. Tasai, K. Naganuma, N. Fuutagawa, Y. Takiguchi, T. Hamaguchi, M. Ikeda, Y. Enya, S. Takagi, M. Adachi, T. Kyono, Y. Yoshizumi, T. Sumitomo, Y. Yamanaka, T. Kumano, S. Tokuyama, K. Sumiyoshi, N. Saga, M. Ueno, K. Katayama, T. Ikegami and T. Nakamura, "Long-Lifetime True Green Laser Diodes with Output Power over 50 mW above 525 nm Grown on Semipolar $\{20\bar{2}1\}$ Ga_N Substrates", Appl. Phys. Express 5 (2012) 082103
- (7) S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota and S. Nakamura, "Spontaneous emission of localized excitons in InGa_N single and multiquantum well structures", Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 4188
- (8) T. Takeuchi, S. Sota, M. Katsuragawa, M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano and I. Akasaki, "Quantum-Confined Stark Effect due to Piezoelectric Fields in GaInN Strained Quantum Wells", Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) L382
- (9) I-hsui Ho and G. B. Stringfellow, "Solid phase immiscibility in GaInN", Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 2701
- (10) Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita and S. Nakamura, "Role of self-formed InGa_N quantum dots for exciton localization in the purple laser emitting at 420 nm", Appl. Phys. Lett. 70 (1997) 981
- (11) Y. Narukawa, Y. Kawakami, S. Fujita and S. Nakamura, "Dimensionality of excitons in laser-diode structures composed of In_xGa_{1-x}N multiple quantum wells", Phys. Rev. B 59 (1999) 10283
- (12) S. Nagahama, T. Yanamoto, M. Sano and T. Mukai, "Wavelength Dependence of InGa_N Laser Diode Characteristics", Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 3075
- (13) T. Hino, T. Asano, T. Tojyo, S. Kijima, S. Tomiya, T. Miyajima, S. Uchida and M. Ikeda, "Estimation of Device Properties in AlGaInN-Based Laser Diodes by Time-Resolved Photoluminescence", phys. status solidi (a) 1 (2001) 101
- (14) 元木健作、「窒化ガリウム基板の開発」、SEIテクニカルレビュー175号、pp.10-18 (2009)
- (15) G. Gourdon and P. Lavallard, "Exciton Transfer between Localized States in CdS_{1-x}Se_x Alloys", phys. status solidi (b) 153 (1989) 641
- (16) A. Kaneta, Takashi Mutoh, Y. Kawakami, S. Fujita, G. Marutsuki, Y. Narukawa and T. Mukai, "Discrimination of local radiative and

- nonradiative recombination processes in an InGaN/GaN single-quantum-well structure by a time-resolved multimode scanning near-field optical microscopy”, *Appl. Phys. Lett.* 83 (2003) 3462
- (17) M. Funato and Y. Kawakami, “Excitonic properties of polar, semipolar, and nonpolar InGaN/GaN strained quantum wells with potential fluctuations”, *J. Appl. Phys.* 103 (2008) 093501
- (18) K. Nishizuka, M. Funato, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, “Efficient rainbow color luminescence from $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ single quantum wells fabricated on $\{11\bar{2}2\}$ microfacets”, *Appl. Phys. Lett.* 87 (2005) 231901
- (19) 西塚幸司、「半極性および無極性面 InGaN 量子井戸における発光遷移過程の解明」、京都大学博士論文 (2006)
- (20) Y. Narukawa, Y. Kawakami, Sz. Fujita, Sg. Fujita and S. Nakamura, “Recombination dynamics of localized excitons in $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$ - $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ multiple quantum wells”, *Phys. Rev. B* 55 (1997) R1938
- (21) A. Kaneta, M. Funato and Y. Kawakami, “Nanoscopic recombination processes in InGaN/GaN quantum wells emitting violet, blue, and green spectra”, *Phys. Rev. B* 78 (2008) 125317
- (22) A. Kaneta, Y. -S. Kim, M. Funato, Y. Kawakami, Y. Enya, T. Kyono, M. Ueno and T. Nakamura, “Nanoscopic Photoluminescence Properties of a Green-Emitting InGaN Single Quantum Well on a $\{20\bar{2}1\}$ GaN Substrate Probed by Scanning Near-Field Optical Microscopy”, *Appl. Phys. Express* 5 (2012) 102104

執筆者

京野 孝史* : 半導体技術研究所 主査 博士 (工学)



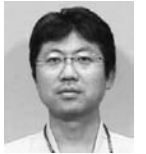
塩谷 陽平 : 半導体技術研究所



西塚 幸司 : 半導体技術研究所 主査 博士 (工学)



上野 昌紀 : 半導体技術研究所 グループ長
博士 (理学)



中村 孝夫 : 半導体技術研究所 部長 博士 (工学)



川上 養一 : 京都大学 工学研究科 電子工学専攻
教授 工学博士



*主執筆者